

基于地面三维激光扫描技术的多尺度变形监测

郭献涛^{**}, 杨立君, 康亚^{*}

南京邮电大学地理与生物信息学院, 江苏 南京 210023

摘要 针对传统变形监测中整体变形模型无法有效提供监测对象局部独特详细变形信息的不足, 基于地面三维激光扫描技术提出一种包含元变形、子变形、变形图的三层混合变形模型, 并设计了一种基于单元的变形计算方法。该方法主要包括单元分割、变形估计、变形融合等 3 方面内容, 可以实现无先验监测信息条件下, 自动增量地提取不同尺度的变形信息。模拟实验结果表明, 在该方法下, RANSAC 算法的平面拟合回归估计角度变化误差均值为 1.21", 估计可靠性在一定范围内随单元大小增大而提高; 滑坡实验结果表明, 最小值法位移估计结果噪声更少, 0.2 m 单元大小分割可以提供更多的变形估计细节。所提方法尤其适用于具有非均匀变形特性的监测领域, 对推动滑坡等人员难以到达的灾害监测从“点监测”向“面监测”的转变具有一定的理论与实际意义。

关键词 测量; 激光扫描; 变形监测; 混合模型; 三维分割; 变形估计

中图分类号 P232

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232304

Multiscale Deformation Monitoring Based on Terrestrial 3D Laser Scanning Technology

Guo Xiantao^{**}, Yang Lijun, Kang Ya^{*}

School of Geographic and Biologics, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract Regarding the deficiency of traditional deformation monitoring in effectively detailing deformation of local unique monitoring objects due to the overall deformation model, this paper proposes a three-layer mixed deformation model, i. e., block, region, and overall deformation, based on terrestrial 3D laser scanning technology. A block-based deformation calculation method is also designed. This method mainly includes object segmentation, deformation estimation, and deformation fusion, and can automatically extract deformation information of different scales without prior monitoring information. Simulation results show that under this method, the mean angle change estimation error of RANSAC algorithm plane fitting regression is 1.21", and the estimation reliability increases with an increase in block size within a certain range. The results of the landslide experiment show that the minimum value method has less displacement estimation noise, and a 0.2 m block size segmentation can provide further deformation estimation details. The proposed method is particularly suitable for monitoring fields with nonuniform deformation characteristics, and has certain theoretical and practical significance for promoting the transformation of disaster monitoring from "point monitoring" to "surface monitoring" for landslides and other disasters that are difficult for personnel to reach.

Key words measurement; laser scanning; deformation monitoring; hybrid model; 3D split; deformation estimation

1 引言

在传统测量领域中, 通常利用全站仪、GPS 等单点监测技术, 监测布设于重点部位上的离散监测点, 通过监测点信息, 建立单一变形模型提取变形信息^[1-2]。

该方法可以很好地表达整体具有相似或一致变形的监测对象, 但无法有效描述监测对象不同子区域的独特详细变形, 同时监测点密度通常都非常低, 监测点一旦遭到破坏将严重影响数据的连续性。此外, 由于这类技术通常需要合作目标, 应用于人员难以到达的灾害

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2023-11-06; 录用日期: 2023-11-27; 网络首发日期: 2023-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(42304026)、教育部产学合作协同育人项目(202102245033)、南京邮电大学校级自然科学基金项目(NY222136)

通信作者: *137258741@qq.com; **xiantaoguo@njupt.edu.cn

监测领域存在一定的困难与风险^[3]。

近年来,得益于地面、机载和星载遥感技术的发展,在宽泛时空尺度上探测变形的能力有了很大提高。尤其是地面激光扫描(TLS)技术,实现了测程、精度、密度、免接触,以及3D测量功能的统一^[4],打开了实现监测对象更多变形信息的潜力通道,有助于全面掌握对象变形的细节和破坏机理。目前,基于TLS技术的变形监测还处于研究阶段,其早期研究通常利用商业软件生成简单的地形信息,以辅助变形评估^[5]。近年来,研究人员开始探索如何利用TLS数据建立变形模型。

一些学者利用TLS点云拟合规则模型(平面、圆柱体等常规对象)实施变形研究^[6-12],基本思想是利用扫描数据的高冗余性克服TLS单点精度的局限性,可以获得点云的高质量变形参数,得到隧道、大坝、建筑墙壁等规则形状对象的高精度变形信息^[13-16],但该方法依赖于特定规则模型,且得到的信息通常为特定方向的一维变形。

一些学者通过直接比较不同监测时期点云的不规则模型(DEM、DSM模型等)实施TLS变形监测研究^[17-21],该方法有两个明显的不足。首先,DEM常在二维下定义[即 $z=f(x, y)$],无法有效处理悬垂部分,对微变形不敏感;其次,整体模型求差主要提供 z 方向的一维变形量。

此外,Pesci等^[22]利用迭代最邻近点法(ICP)计算滑坡位移,对点云进行直接比较提取变形信息,克服了DEM差分法无法有效处理悬垂部分的限制,但由于对于第二期点云中的每个点,总可以在第一期点云中定义一个最近点,该方法并不一定代表对象表面的真实变形,且该方法对异常值及点间距变化较敏感,无法计

算空间变量置信区间,常用于高密度点云快速变化检测。Monserat等^[23]利用最小二乘曲面匹配提取变形的变换参数,这种方法给出了一些特定选择目标的变形,但缺少描述整体对象的变形信息。Oppikofer等^[24]提出了一种仿射变换来描述不同部位的岩石滑动位移,但需要地形的先验知识来选择这些局部区域。Schürch等^[25]给出了一个建筑物位置和内部设施变化探测法,利用八叉树实施点云间的不同比较算法,其中,一些算法适于快速、粗糙的变化评估,可用于现场验证,但得到的位移精度不高。Lemmens等^[26]提出了统计变形分析法,把监测对象分割成平面片,对每个变形平面片进行最小二乘计算,并对得到的变形参数进行统计分析,能够以低于点云单点精度的量级探测变形,缺点是需要明确的模拟表面分割片,适用性较差。

上述研究主要采用传统变形监测整体模型,或仅利用先验信息对预选部分区域进行监测与模拟。对于给定监测对象,整体模型通常只适用于一种变形类型(如位移),而大型监测区域(如滑坡),变形可能异构,即其特定区域可能需要应用不同变形模型。本文提出一种混合变形模型与基于单元的变形计算方法,在不依赖先验信息的前提下,通过分析TLS点云数据,得到监测对象不同区域的多尺度变形信息。

2 混合变形模型

传统变形监测通常采用布设于重点监测部位的有限离散监测点[图1(a)],通过整体变形模型求差提取变形信息。采用整体变形模型主要是因为采样点有限,而三维激光扫描技术的出现,实现了监测对象的快速高密度点云数据采集,打开了探测监测对象局部特详细变形信息的潜力通道。

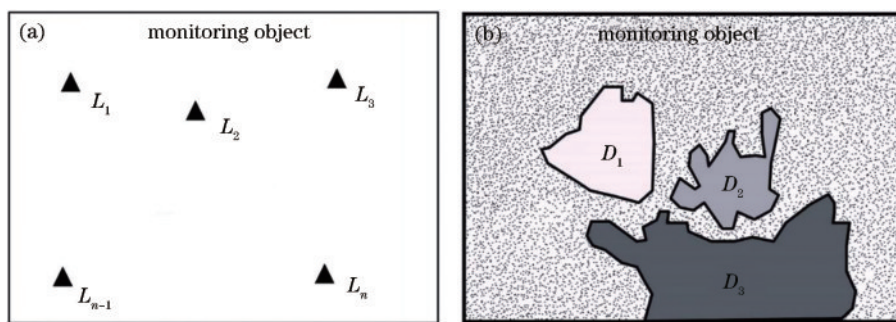


图1 变形监测模式。(a)传统离散点变形监测;(b)变形异构点云监测

Fig. 1 Deformation monitoring type. (a) Traditional discrete point deformation monitoring; (b) deformation heterogeneous monitoring using point cloud

图1(b)中, D_1 、 D_2 和 D_3 是监测对象上的3个重要局部区域,它们分别具有不同的变形类型需要单独识别。如果采用传统离散点监测整体模型进行点云变形提取将无法有效反映所有变形区域的实际变形情况,且具有以下局限性:1)从计算能力看,基于离散点的整体模型不能满足建模高密度点云的需要,数以百万计

的点云数据点若应用整体模型,观测值数量远大于参数数量,对解决超定系统无效;2)激光点云扫描测点具有不可重复性,采用离散点整体模型求差无法实现基于扫描点的对应关系计算变形。

因此,传统离散点变形监测模式与整体变形模型无法解决基于点云的变形监测问题,本文提出基于点

云的混合变形模型与基于单元的点云变形监测方法。

假定监测对象两期扫描点云分别为 $S^I = \{S_1^I, S_2^I, \dots, S_m^I\}$ 与 $S^{II} = \{S_1^{II}, S_2^{II}, \dots, S_m^{II}\}$, 其中, 扫描点 $S_i^I = [x_i^I, y_i^I, z_i^I]$, $S_i^{II} = [x_i^{II}, y_i^{II}, z_i^{II}]$, 通过设计以下混合模型, 以期获得对整个监测对象的多尺度变形信息描述。

$$D = S^I - S^{II} = G[T_1(X_1), T_2(X_2), \dots, T_u(X_u)] + V, \quad (1)$$

式中: D 为监测对象下某个区域的实际变形; $G[T_1(X_1), T_2(X_2), \dots, T_u(X_u)]$ 为包含 u 个子变形模型的混合模型, $T_i(X_i)$ 为对象第 i 个子区域的变形模型, V 为实际变形与模型估计变形间残差。该混合模

型可提供精确局部信息及整个对象的多信息描述。为更好地解释与理解该混合模型, 定义该混合模型下的 3 个尺度结构, 即元变形、子变形、变形图。

2.1 监测对象元变形

混合模型旨在提供全面变形描述, 包括对象局部区域独特子模型。在某些情况下, 可以给出感兴趣的部分区域的先验信息分析变形, 但在很多真实变形场景中, 无法预知监测对象子区域的先验信息。

为自动识别局部区域, 本文把监测对象均匀分割成 3D 单元, 每个单元分别对应两期监测点云数据, 如图 2 所示的 C^I 和 C^{II} 所示, 并用元变形来描述两期对应单元变形。

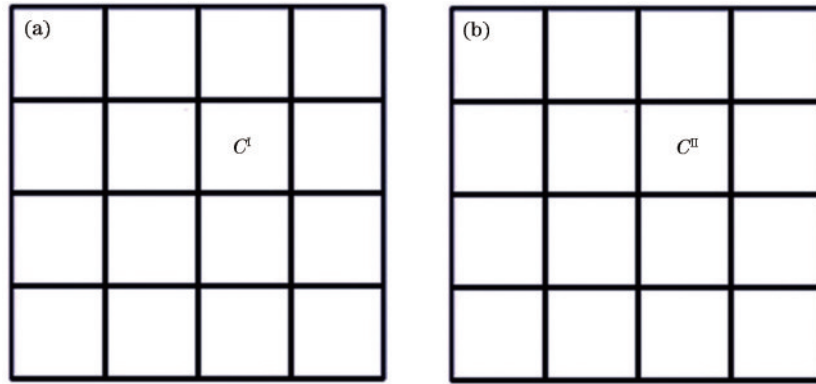


图 2 元变形单元对应。(a) I 期单元; (b) II 期单元

Fig. 2 Corresponding blocks. (a) Block in I epoch; (b) block in II epoch

假定 C^I 和 C^{II} 分别为一个 3D 分割单元在监测 I 期和 II 期上对应的点云数据, $C^I \in S^I$, $C^{II} \in S^{II}$ 。元变形 D^C 为该单元两个对应部分间的几何变化:

$$D^C = C^{II} - C^I = D^C(C^I, C^{II}). \quad (2)$$

由于单元划分尺寸较小, 单元内的几何变化可认为一致。可采用垂直位移、角度变化、旋转, 以及平移等多种变形模型计算 D^C 。

2.2 监测对象子变形

利用单一模型对每个单元进行元变形估计后, 将变形相似的相邻单元聚类, 作为监测对象的子区域, 可得到用于描述监测对象的第二级变形信息, 即第 i 个子区域的变形(子变形)。如 $D_i^A = T_i(X_i)$, 可以通过类似元变形 D_i^C 聚类毗连单元 ($C_i; \dots; C_j$) 来计算子变形。

以图 3 为例, 单元根据它们的元变形聚类相邻单元。对于 $T_i(X_i)$, 可基于该局部区域内的单元 ($C_i; \dots; C_j$) 的元变形计算综合变形。在该图中, 计算 u 个局部区域的子变形, 即从 D_1^A 到 D_u^A 。

2.3 监测对象变形图

基于小单元的元变形和局部区域子变形, 可进一步得到表示监测对象完整变形信息的描述, 即变形图。 $D = \{D_1^A, D_2^A, \dots, D_u^A\}$ 是对整个监测对象的完整变形描述, 其中, 包括子区域的独特变形, 即 $D_i^A = T_i(X_i)$ 。

一般变形图可以由以下两种子变形组成:

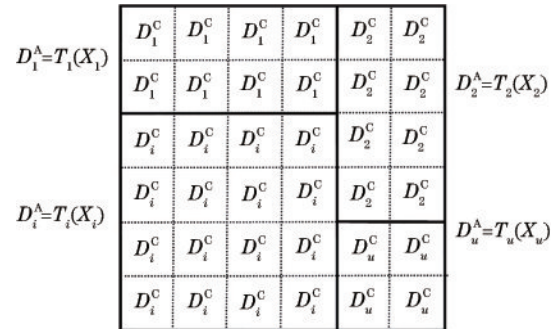


图 3 含有 u 个子区域变形的变形对象

Fig. 3 Deformation object with u sub-regions

1) 子区域变形类型相同, 变形参数不同:

$$S^I - S^{II} = G[T(X_1), T(X_1), \dots, T(X_u)] + V, \quad (3)$$

式中: $G[T(X_1), T(X_1), \dots, T(X_u)]$ 是包含相同变形类型 $T(X)$, 但在子区域上具有不同变形参数 X_i 的混合模型。 V 是该混合模型 $G(\cdot)$ 与对象实际变形间的残差。

2) 子区域变形类型不同, 如沉陷、角变化、平移等:

$$S^I - S^{II} = G[T_1(X_1), T_2(X_1), \dots, T_u(X_u)] + V, \quad (4)$$

式中: $G[T_1(X_1), T_2(X_1), \dots, T_u(X_u)]$ 是包含不同变形类型 $T_i(X)$, 且各子区域具有独特参数 X_i 的混合模型。

3 变形计算方法

所提基于单元的变形计算方法,可以在无先验信息条件下,自动增量地计算混合模型中对应的三层变形信息,主要包括对象分割、变形估计、变形融合等 3 个方面内容。采用较小的单元划分可以实现混合模型中元变形模型的一致覆盖,也避免了传统方法中整

体利用点云的海量计算问题。

3.1 对象分割

通过对象分割将对象空间均匀划分为 3D 单元,并分别获取其在 I 期与 II 期对应的点云数据。基于分割单元,设计变形估计算法以处理一小部分点集。为高效访问划分单元内的数据,本文选择 R 树空间索引技术管理点云,如图 4 所示。

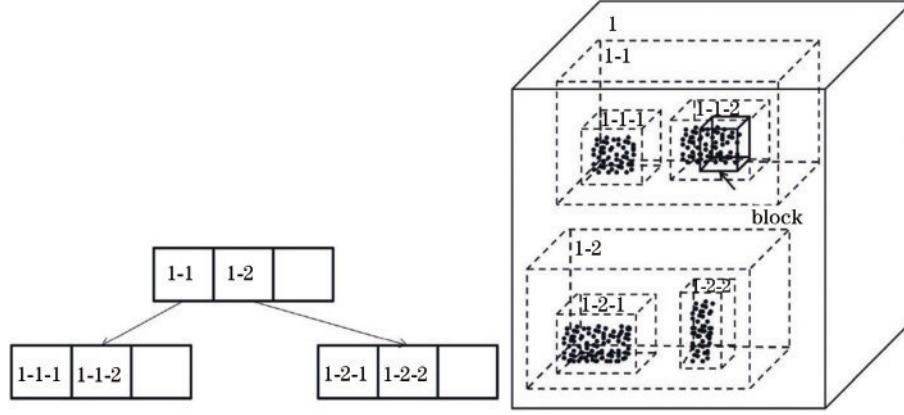


图 4 R 树结构与空间索引

Fig. 4 R-tree structure and spatial index

加载扫描点云数据 S 后,构建 R 树索引,根据 S 中的所有点,提取 x 、 y 、 z 轴上的最大值和最小值(即 x_{\min} 、 y_{\min} 、 z_{\min} 、 x_{\max} 、 y_{\max} 、 z_{\max});创建一个可以包含点云的边界框。自定义单元格的长宽高(L 、 W 、 H), x 、 y 和 z 轴上的单元数量(N_x 、 N_y 、 N_z)的计算如下:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_{\max} - x_{\min})/L \\ (y_{\max} - y_{\min})/W \\ (z_{\max} - z_{\min})/H \end{pmatrix}. \quad (5)$$

然后,计算所有单元的边界范围,单元 C_{ijk} 的约束 B_{ijk} 如下:

$$B_{ijk} = \begin{pmatrix} L_i + x_{\min}, L_{1+i} + x_{\min} \\ L_j + y_{\min}, W_{1+j} + y_{\min} \\ L_k + z_{\min}, H_{1+k} + z_{\min} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

利用该约束,通过 R 树索引可从点云 S 中高效访问位于 B_{ijk} 中的数据点。通过沿 x 、 y 、 z 轴的 3D 索引,将该单元编码为 $C_{\text{ID}}^{(3)} = \langle i, j, k \rangle$,作为单元的 ID。为快速访问,可进一步改写为 1D 标识 $C_{\text{ID}}^{(1)}$:

$$C_{\text{ID}}^{(1)} = (1 + N_x)j + (1 + N_y)(1 + N_z)k + i. \quad (7)$$

最后,对于每个单元,根据 R 树索引输出每个单元内的分割点云数据。

3.2 变形估计

将对象分割为 3D 单元后,基于单元内点云选择相应的估计方法计算单元的元变形,可以选择位移、角度变化、旋转,以及刚性转换等变形类型,其中,垂直位移和角度变化是变形监测广泛使用的基本类型,分别代表了监测对象的“平移”和“旋转”变化,本文主要研究这两种变化。

3.2.1 垂直位移

传统离散点监测变形分析,通常比较监测点两期坐标值计算垂直位移。因此,对于每个单元,需要计算一个统计参数来近似表示其高度信息,以用于垂直位移估计。通常可以采用每个单元 Z 值的统计特征(最小、最大、平均、中位数等)计算基线来近似该信息(见图 5),每个单元的垂直信息近似用黑色五角星表示。图 5(a)中的单元 1, $Z_{\min}(C^I)$ 和 $Z_{\min}(C^II)$ 分别表示 I 期和 II 期中该单元中所有采样点的最小 Z 值。单元 2、单元 3 与单元 4 分别采用最大值、平均值和中位数法计算垂直位移。

在确定单元垂直统计值后,可以很容易地确定每个单元两期数据扫描间的位移。以最小值法为例,比较同一单元内所有沿 Z 方向坐标在 II 期的最小值 $Z_{\min}(C^II)$ 和在 I 期的最小值 $Z_{\min}(C^I)$ 。垂直位移 $D_{\text{ID}}^C \{V_{\min}\}$ 计算如下:

$$D_{\text{ID}}^C \{V_{\min}\} = Z_{\min}(C^II) - Z_{\min}(C^I). \quad (8)$$

除了最小值、最大值、平均值,以及中位数等标准方法外,本文还设计了基于单元采样点估计“中心”点的高程估计法,称为“中心法”。该方法需要做表面回归,以找到最优拟合平面(该平面最小化单元内所有点误差平方和)。在拟合平面上,以单元中心 Z 值表示该单元高程信息,输出的是单元中心 $\{C_i\}$ 的近似坐标以及最优拟合平面法线。

奇异值分解总体最小二乘法不能很好地应用于异常值过多的点云,为此,引入一种鲁棒平面拟合法,即随机抽样一致性(RANSAC)算法,该算法是一种迭代拟合模型。

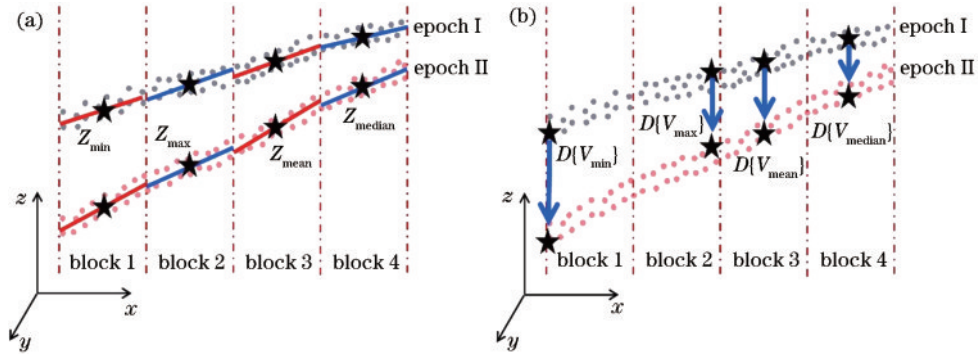


图 5 单元垂直变形。(a)基线近似姿态;(b)单元变形估计

Fig. 5 Vertical deformation of blocks. (a) Baseline near-quasi-attitude; (b) block deformation estimation

首先,随机选择 n 点,并计算一个平面来拟合这 n 个点。其次,根据给定的阈值判断剩余的点是否属于该平面,迭代实施这两步。在每一次迭代中,把获得的平面与上一个平面进行比较。若当前平面好于上一个最好的平面,当前平面将取代之成为新的最好平面。最后,计算垂直位移元变形:1)通过关联索引得到 I 期和 II 期单元内的点;2)根据“中心法”估计计算垂直位移;3)输出两期单元垂直位移。

3.2.2 角度变化

为了计算角度变化,采用引入的 RANSAC 算法,利用单元每期点云拟合一个平面。与“中心法”使用 Z 轴中心值近似每个单元不同,角度变化法计算拟合平面和水平表面间的角度。通过 RANSAC 算法返回的两期单元法线,可计算这些角度差异,应用其差值作为该单元的元变形。

图 6 中,8 个实线是 3D 单元点的最优拟合平面。 δ^I 和 δ^{II} 分别为 I 期和 II 期拟合平面和水平面间夹角。计算 δ^I 和 δ^{II} 间角度差可以得到角度变化信息。

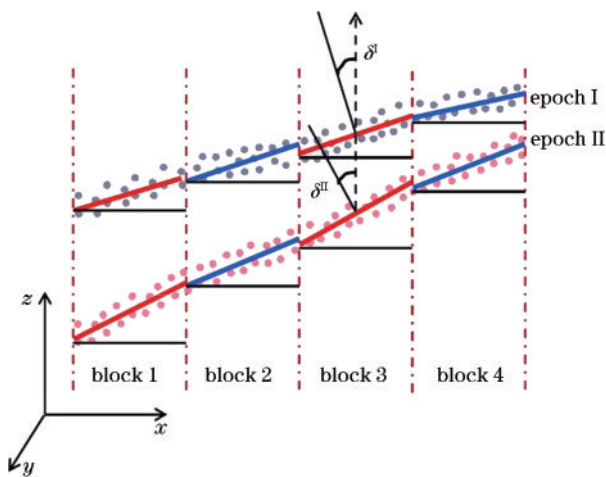


图 6 单元平面拟合表示

Fig. 6 Angle representation for blocks

式(9)给出了 I 期和 II 期单元 C_{ID} 的两个拟合平面。为简单起见,使用 4 个系数表示该表面,即 $\langle a_{ID}^I, b_{ID}^I, c_{ID}^I, d_{ID}^I \rangle$ 和 $\langle a_{ID}^{II}, b_{ID}^{II}, c_{ID}^{II}, d_{ID}^{II} \rangle$ 。

$$\begin{cases} C_{ID}^I: a_{ID}^I x + b_{ID}^I y + c_{ID}^I z + d_{ID}^I = 0 \\ C_{ID}^{II}: a_{ID}^{II} x + b_{ID}^{II} y + c_{ID}^{II} z + d_{ID}^{II} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

基于单元点拟合两期最优平面,并计算其法线, I 期为 $n^I = (n_x^I, n_y^I, n_z^I)$, II 期为 $n^{II} = (n_x^{II}, n_y^{II}, n_z^{II})$ 。两平面法线的角度差 $\hat{\delta}$ 即为元变形 $D_{ID}^C \{ \delta \}$:

$$\hat{\delta} = \arccos \left[(n^I \cdot n^{II}) / (|n^I| \cdot |n^{II}|) \right]. \quad (10)$$

以上元变形估计过程主要分为两部分:一是加载每个单元的两期点云数据;二是采用不同的估计方法计算每个单元的元变形。

3.3 变形融合

计算得到了每个单元的元变形,就可以定义具有一致变形的区域,融合区域内具有一致变形的单元,作为局部区域的子变形,进而生成整个对象的变形图。在变形图中,对象局部区域应该具有一致,甚至统一的变形。基于元变形参数(如垂直位移和角度变化)从元变形中计算变形图包括以下步骤:

1)定义变形度。把元变形值划分为一组不重叠的变形度。例如,估计位移在 0~10 cm 之间,可以用 1 cm 的间隔对其进行划分,得到 10 个变形度。除定量划分变形度外,还可以定性表示变形,如 { 稳定、小、中、大 }。

2)分配变形度。对于每个单元,根据元变形估计中计算的变形值分配预先确定的变形度(标签)。图 7(a)给出了一个说明性例子,给每个单元分配一个从 1~3 的变形标签,分别对应于“小”“中”“大”变形。

3)聚类同度单元。比较相邻所有单元的变形度。如果值相同,则将单元聚集在一起。重复此过程,直到处理完所有单元。聚类过程中设计递归函数,通过增加具有相同变形度的相邻单元的候选部分来扩展区域,见图 7(b)。该扩展区域函数中,用单元 C_i 检查候选区域(D^A):若 C_i 具有与 D^A 相同的变形程度,算法递归检查它的邻近单元,若变形与该区域相同,则添加这些单元,直到没有更多的邻近可以添加。

4)生成变形图。若单元与其相邻单元出现显著不同的变形特征[见图 7(c)中红色标示单元],将该单元视为异常值,并将相邻单元的元变形“标签”分配给该单元。

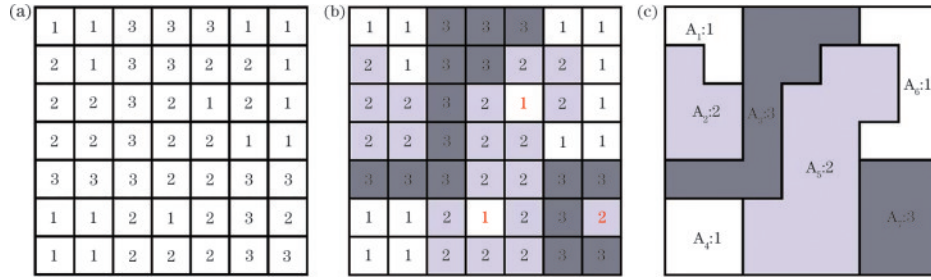


图 7 变形融合过程。(a)单元变形度;(b)聚类变形;(c)变形图生成

Fig. 7 Deformation merge process with label. (a) Block deformation degree; (b) merger deformation; (c) deformation graph generation

通过融合操作,用其邻近单元平滑元变形,得到一个更加抽象的变形描述,但也会丢失一些细节信息。

4 实验验证

为评估所提方法的性能,分别采用模拟实验与实测案例进行验证。

4.1 模拟实验

通过 Matlab 构建合成点云数据,以模拟地表沉降,见图 8(a)。I 期模拟表面为单一平面;II 期下沉后滑动为两个平面,其中,右上表面较为陡峭(与水平面夹角 $\alpha_1 = 22.913^\circ$),左下表面较为平缓(与水平面夹角 $\alpha_2 = 15^\circ$),见图 8(b)。

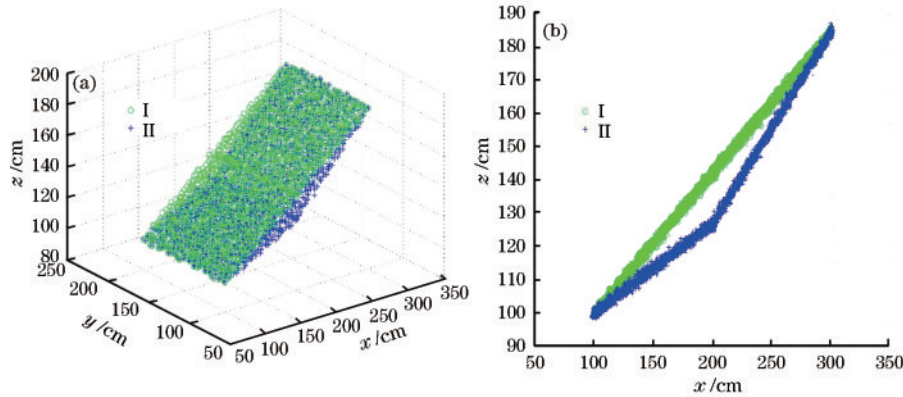


图 8 I 期和 II 期模拟点云。(a)3D 点云;(b) 2D 投影

Fig. 8 Simulated subsidence point clouds of epoch I and II. (a) 3D point cloud; (b) 2D projection

4.1.1 数据合成

为了模拟激光扫描监测表面变形详细信息,选择合理高密度(沿 X 轴与 Y 轴每 5 mm × 5 mm 1 个点)采样 3D 点生成两期表面(S^I 和 S^{II})的 8.0714×10^4 个采样点。为了模拟真实数据,考虑地面激光扫描的随机误差,添加高斯噪声(生成了 5 组均值为零,标准差不同的噪声)到合成数据中。图 8(a)显示了包含 $\sigma = 3$ mm 的高斯噪声的两期模拟点云,同时分析不同噪声水平对变形参数性能的影响。

4.1.2 对象分割与变形估计

为了计算变形参数,根据预定义长宽高将包含监测表面的空间分割成边长为 5 cm 的立方体单元格,得到 1.4324×10^4 个变形计算单元。通过式(10)“平面拟合”回归法计算该合成场景单元 $D_{in}^C \{ \delta \}$ 的元变形 $\hat{\delta}$ (RANSAC 算法返回的两期单元法线的角度差),并将结果与真实变形情况进行比较,分析单元大小和噪声的影响。

4.1.3 角度变形与噪声分析

为了评价元变形估计结果,将估计的角度方差 $\hat{\delta}$ 与实际值 δ 比较,计算所有残差值 $\Delta\delta = \hat{\delta} - \delta$,并取所

有单元 $\Delta\delta$ 的均值 $\overline{\Delta\delta}$ 作为评价标准。

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\Delta\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{\delta}_i - \delta_i|}{N} \\ \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{\delta}_i - \delta_i|^2}{N-1} \end{array} \right. \quad (11)$$

式中: N 是 I 期和 II 期单元中用于拟合平面的相应点云的点数量。

根据式(11)计算可得到, $\hat{\delta}$ 和 δ 之间的误差均值 $\overline{\Delta\delta}$ 为 1.21", 标准差为 2.32"。部分选定单元的元变形估计如表 1 所示。

在该表中, $C_{in}^{(1)} = \{914, 12896\}$ 具有较差的估计结果,原因可能是这两个单元包含的点太少,无法实现对元变形的可靠估计,如 C_{914} 在 I 期只有 5 个点,在 II 期只有 9 个点。为避免这种弱估计,排除包含少量点的单元。根据所有单元数据点直方图推导出拒绝域,约 10% 的单元被排除,大多数位于监测对象的边缘。

图 9 给出了变形估计的重要影响参数(噪声水平

表 1 部分单元的元变形估计结果

Table 1 Results of meta-deformation estimation for some blocks

C_{id}^I	I epoch				II epoch				$\hat{\delta}/(^{\circ})$	$\delta/(^{\circ})$	$\Delta\delta/(^{\circ})$
	n_P^I	n_x^I	n_y^I	n_z^I	n_P^{II}	n_x^{II}	n_y^{II}	n_z^{II}			
1	40	-0.3901	-0.0002	0.9195	100	-0.2602	-0.0001	0.9599	7.9754	7.9113	0.0640
7	100	-0.3892	0.0003	0.9197	100	-0.2603	0.0003	0.9599	7.9091	7.9113	-0.0023
39	100	-0.3895	0.0001	0.9198	30	0.2604	0.0001	-0.9593	7.9740	7.9113	0.0626
914	5	0.00001	-0.9000	0.00002	9	0.00001	-0.9000	0.00002	0.00001	7.9113	reject
1751	80	0.3892	0.0002	-0.9200	100	-0.2606	-0.0001	0.9592	7.9055	7.9113	-0.0059
11259	20	-0.3896	0.0006	0.9192	70	0.5061	-0.0002	-0.8599	6.9712	7.0889	-0.1174
12896	6	0.0000	-1.000	0.0000	9	0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	7.0889	reject
114594	100	-0.3895	-0.0006	0.9193	20	-0.5062	-0.0007	0.8591	7.0528	7.0889	-0.0358

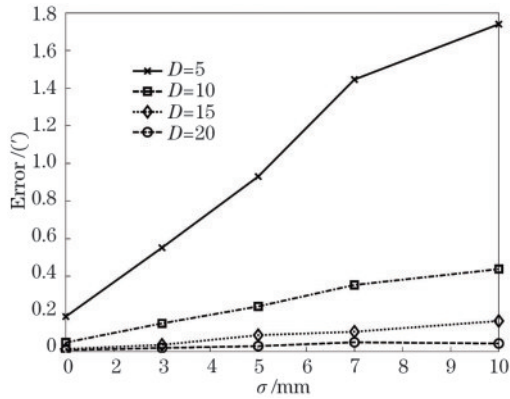


图 9 不同噪声水平(σ)与单元大小(D)下的估计误差
Fig. 9 Error estimation under different noise levels (σ) and block sizes (D)

和单元大小)对元变形估计的影响。当点云中噪声标准差 σ 增大时,变形估计误差也增大。对于平面估计来说,由于平面拟合涉及的点较多,估计结果随着单元大小的增大而变好。

4.2 实例验证

为进一步评估,应用所提方法于一个真实滑坡场景。该滑坡沿一条主要铁路线,大小约为 $200\text{ m} \times 25\text{ m}$ (见图 10),滑坡边坡为图中线划内区域。利用地



图 10 滑坡实例
Fig. 10 Landslide case

面激光扫描仪分别于 2021 年 7 月和 9 月(滑坡发生后)采集了两期密集点云,点数分别为 20310782 和 16362884。实验内容主要包括:最终变形图生成;单元大小对元变形估计灵敏度分析;不同估计模型的比较。

4.2.1 变形图生成

本实验以垂直位移作为元变形信息,通过“最小值”法(以抑制植被变化影响)提取每个单元的元变形,根据所提方法最终生成的变形图如图 11 所示。由该图可知:1)该滑坡区域大部分沉降在 0 值附近变动;2)滑坡下部边缘呈上升态势(约 0.4 m);3)该滑坡区域有两个点上升超过 1 m 。经分析,1)和 2)主要是自然原因导致的,3)是土方工程施工车辆进入工地所致的。

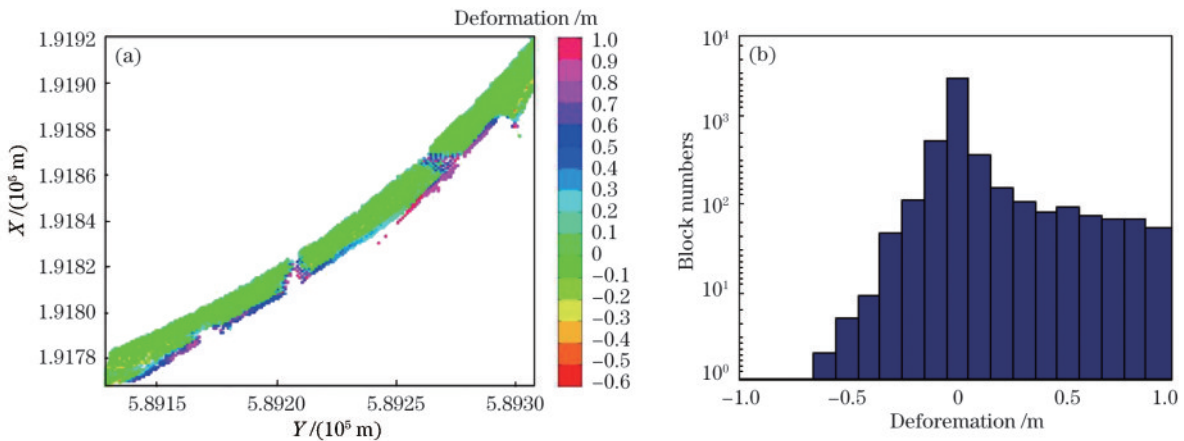


图 11 最小值法滑坡变形图与变形分布。(a)变形图;(b)变形分布
Fig. 11 Deformation graph of landslide. (a) Deformation graph; (b) deformation distribution

对所有单元垂直位移的分布情况进行分析可知：下沉(负值)位于 0.5~0 m 之间,许多单元沉降量较小(接近于零),但少部分达到 0.5 m;隆起部分(正值)几乎均匀分布于 0~1 m 之间。总之,整体变形是沉降,符合滑坡场景,且与 DEM 差分法位移提取结果一致。

4.2.2 单元大小灵敏度分析

选择合适的单元大小可以高效、准确地获取整个区域的变形信息。若单元尺寸过小,计算将较为费时,元变形估计也不稳定;若单元尺寸过大,将影响元变形估计精度。因此,如何优化单元大小是 3D 分割的关键步骤。根据位移大小,本实验分别选择 0.2 m、0.4 m、0.6 m、1.0 m 的单元尺寸进行单元划分。

图 12 给出了不同单元大小,元变形估计的稳定性,纵坐标为位于特定变形区间对应的变形区域占整个变形区域的比值。由图可知,不同单元大小结果非常相似,但 0.2 m 单元大小提供了更多关于小变化 $[-0.2\sim-0.1]$ m 和 $[-0.1\sim 0]$ m 的结果,而当单元

大小为 0.6 m 或 1.0 m 时,位于 $[0\sim 0.1]$ m 和 $[0.1\sim 0.2]$ m 区间中的变形非常少,说明较小的单元划分可以提供较好的位移估计细节。

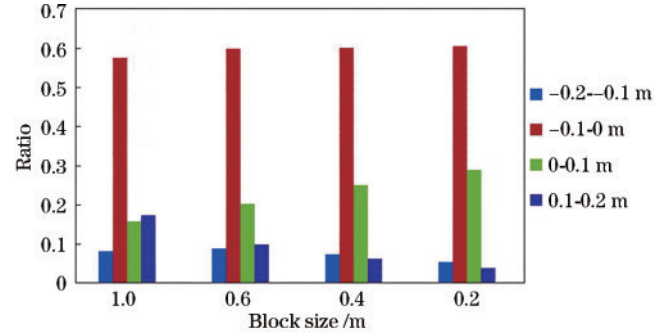


图 12 不同单元大小变形分布

Fig. 12 Deformation distribution of different block sizes

4.2.3 不同变形模型估计

除了上述最小值法,分别采用其他几种不同的方

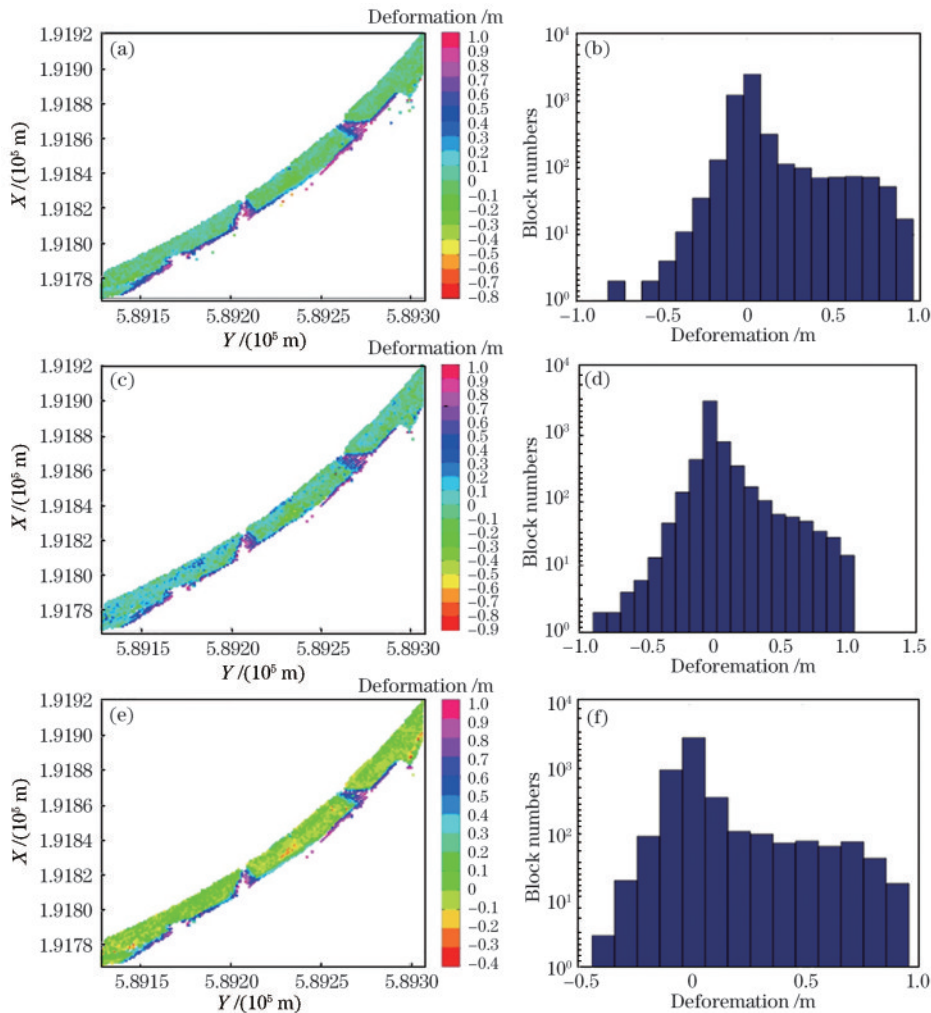


图 13 不同估计方法滑坡变形图与变形分布。(a)中位数法变形图;(b)中位数法变形分布;(c)最大值法变形图;(d)最大值法变形分布;(e)均值法变形图;(f)均值法变形分布

Fig. 13 Deformation estimation by different methods. (a) Deformation graph by median method; (b) deformation distribution by median method; (c) deformation graph by maximum method; (d) deformation distribution by maximum method; (e) deformation graph by mean method; (f) deformation distribution by mean method

法估计每个单元在两期扫描间的元变形。图 13 为采用中位数法、最大值法和均值法估计得到的变形图及其分布。相比于图 11 中最小值法得到的变形图,图 13(a)、图 13(c)、图 13(e)都包含更多的噪声,特别是图 13(c)和图 13(e),其噪声分散在整个滑坡体上。

类似于图 11 最小值法详细变形,图 13 也给出了这些方法的变形分布情况。由图可知,总体上由中位数法、最大值法和均值法得到的垂直变形与最小值法得到的垂直变形具有类似的直方图分布,大多数垂直位移都集中在 0 m 附近,然而,与图 11 中的分布相比,图 13(b)中的详细分布看起来更合理,这与生成的变形图一致,中位数法与最小值法的结果更为接近。

5 结 论

针对传统变形监测单一整体变形模型无法有效提供监测对象局部独特详细变形信息的不足,通过分析三维激光扫描点云数据,提出一种基于单元的变形计算方法。从变形表示角度看,该方法提供了一个混合模型,可以实现从单元的元变形,局部区域的子变形,到整个对象的变形图逐层次多尺度全面描述变形特性。从计算角度看,该方法设计了一种利用混合模型自动生成变形图的变形分割、变形估计、变形融合的过程,且无需变形对象的先验信息,尤其适用于具有非均匀变形特性的监测领域。

通过合成点云和实测点云对所提方法进行了测试,分析了单元大小的灵敏度以及对噪声的鲁棒性,展示了该混合模型和基于单元的变形计算方法用于变形监测的优点。模拟实验结果表明:RANSAC 算法平面拟合估计单元角度变化标准差为 2.32° ,一定范围内变形估计可靠性随单元大小增大而提高;滑坡实例表明,最小值法位移估计可有效剔除植被噪声影响,0.2 m 单元大小分割可以提供更多的变形估计细节。未来,拟从动态单元划分与局部搜索优化匹配单元对应,以及丰富元变形模型等方面对该方法做进一步的扩展与改进。

参 考 文 献

- [1] Hoffman B N, Savidis N, Demos S G. Monitoring and characterization of particle contamination in the pulse compression chamber of the OMEGA EP laser system [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e39.
- [2] 黄远建, 李晓银, 叶文怡, 等. 基于共聚焦亚像素扫描的高分辨率三维成像[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822014. Huang Y J, Li X Y, Ye W Y, et al. High resolution 3D imaging based on confocal sub-pixel scanning[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822014.
- [3] 郭献涛. 基于地面三维脉冲激光扫描技术的变形监测若干问题研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 568. Guo X T. Research on some problems of deformation monitoring based on ground three-dimensional pulsed

- laser scanning technology[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(4): 568.
- [4] Dong Y Z, Jin Y X, Kong F Y, et al. Angle amplifier in a 2D beam scanning system based on peristrophic multiplexed volume Bragg gratings[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2023, 11: e13.
- [5] 郭献涛, 黄腾, 贾燕, 等. 利用 TLS 技术与伪单点监测模式进行滑坡变形测量[J]. 测绘通报, 2021(6): 106-111. Guo X T, Huang T, Jia Y, et al. Landslide deformation monitoring using TLS technology and pseudo-single point monitoring model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(6): 106-111.
- [6] 郭良林, 周大伟, 张德民, 等. 基于激光点云的巷道变形监测及支护研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(8): 178-183. Guo L L, Zhou D W, Zhang D M, et al. Research on deformation monitoring and supporting of tunnel based on laser point cloud[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(8): 178-183.
- [7] 邓晓隆, 田石柱. 基于三维激光扫描的桥梁变形检测及数据处理[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071201. Deng X L, Tian S Z. Bridge deformation detection and data processing based on 3D laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071201.
- [8] 迟宇, 邓扬, 李爱群, 等. 卢沟桥形变监测分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(8): 63-72, 126. Chi Y, Deng Y, Li A Q, et al. The analysis for the deformation monitoring of Lugou bridge[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(8): 63-72, 126.
- [9] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1200002. Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral lidar imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1200002.
- [10] 徐进军, 郭鑫伟, 张洪波. 基于三维激光扫描技术的桥塔挠度测量[J]. 测绘地理信息, 2017, 42(2): 67-70. Xu J J, Guo X W, Zhang H B. Pylon deflection monitoring based on terrestrial laser scanning[J]. Journal of Geomatics, 2017, 42(2): 67-70.
- [11] 张明智, 张明栋. 三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J]. 城市勘测, 2018(3): 144-147. Zhang M Z, Zhang M D. Application of 3D laser scanning in deformation monitoring of subway tunnel[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(3): 144-147.
- [12] 邹杭波, 夏仁波, 曾元松, 等. 基于多线结构光扫描点云的导管弯曲褶皱度测量方法[J]. 中国激光, 2023, 50(13): 1304001. Zou H B, Xia R B, Zeng Y S, et al. Wrinkle degree measurement method for bend tube based on multi-line structured light scanning point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(13): 1304001.
- [13] 李理, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1056-1062. Li C, Lu X P, Zhu N N, et al. Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based

- on LiDAR points[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(9): 1056-1062.
- [14] Zhao Y, Zhu Z Z, Liu W, et al. Application of 3D laser scanning on NATM tunnel deformation measurement during construction[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(1): 483-494.
- [15] 潘国荣, 张超. 三维激光扫描在地铁隧道变形监测中的开发应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(S1): 1-5.
Pan G R, Zhang C. Development and application of 3D laser scanning in deformation monitoring of subway tunnel [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2016, 39(S1): 1-5.
- [16] 徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2188-2191, 2196.
Xu J J, Wang H C, Luo Y Z, et al. Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2188-2191, 2196.
- [17] 胡春梅, 费华杰, 夏国芳, 等. 激光扫描与摄影测量异源点云高精度配准方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(24): 2415007.
Hu C M, Fei H J, Xia G F, et al. High-precision registration of non-homologous point clouds in laser scanning and photogrammetry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(24): 2415007.
- [18] Zhao Y, Fan L, Seo H. Deformation measurement of a soil mixing retaining wall using terrestrial laser scanning [J]. *Laser in Engineering*, 2023, 54 (1/2/3): 99-121.
- [19] 王举, 张成才. 基于三维激光扫描技术的土石坝变形监测方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(12): 2345-2350.
Wang J, Zhang C C. Deformation monitoring of earth-rock dams based on three-dimensional laser scanning technology[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(12): 2345-2350.
- [20] 顾元元, 陈冉丽, 吴侃, 等. 矿区桥梁变形监测的三维激光扫描技术[J]. *金属矿山*, 2019(10): 188-193.
Gu Y Y, Chen R L, Wu K, et al. Mine bridge subsidence monitoring based on 3D laser scanning technique[J]. *Metal Mine*, 2019(10): 188-193.
- [21] 吕树春. 基于三维激光扫描技术的基坑滑坡监测方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2023, 46(5): 216-218.
Lü S C. Research on monitoring method of foundation pit landslide based on 3D laser scanning technology[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46 (5): 216-218.
- [22] Pesci A, Amoroso S, Teza G, et al. Characterization of soil deformation due to blast-induced liquefaction by UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(22): 8317-8336.
- [23] Monserrat O, Crosetto M. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(1): 142-154.
- [24] Oppikofer T, Hermanns R L, Jakobsen V U, et al. Semi-empirical prediction of dam height and stability of dams formed by rock slope failures in Norway[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, 20(11): 3179-3196.
- [25] Schürch P, Densmore A L, Rosser N J, et al. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(14): 1847-1859.
- [26] Lemmens M. Terrestrial laser scanning[M]//*Geo-information. Geotechnologies and the environment*. Dordrecht: Springer, 2011, 5: 101-121.